La percolation dans les sables. — I. Dunes maritimes de Normandie. Expériences au laboratoire et discussion des résultats.

Par J.-M. Turmel.

L'exposé des résultats des expériences faites sur le terrain dans les dunes de Normandie ont montré que la perméabilité est très variable dans les différentes parties des dunes[1].

D'après l'allure générale des courbes obtenues, on peu classer les résultats, donc les stations, en trois types suivant que les courbes :

1° sont continuellement ascendantes avec asymptote horizontale.

2° sont continuellement descendantes avec asymptote horizontale.

3° passent par un maximum, d'abord ascendantes puis descendantes avec asymptote horizontale.

Si l'on sépare les stations suivant ces trois types de courbes, l'on voit que les courbes ascendantes correspondent uniquement aux stations des dunes mobiles et aux échantillons pris en profondeur dans les dunes fixées ; que les courbes descendantes sont spéciales aux dunes fixées et que celles à maximum peuvent correspondre à des stations des deux types de dunes.

Pour expliquer ces différences, plusieurs séries d'expériences et d'analyses ont été faites au laboratoire.

a) Courbes ascendantes.

Je vais tout d'abord montrer comment se fait la circulation de l'eau dans les sols pour lesquels les expériences de percolation fournissent des courbes ascendantes à faible ou forte ordonnée finale.

1er *cas : Courbes ascendantes à faible valeur asymptotique.*

Plusieurs expériences furent faites sur des échantillons placés dans des cylindres de teneur en air ; la quantité de sable était de 300 gr. à l'état sec. J'ai mesuré non seulement les temps de pénétration de 50 cm³ d'eau dans l'échantillon, mais également le nombre de centimètres cubes qui ressortent au bas du tube pendant le

1. J. M. Turmel. La percolation dans les sables. I. A. Dunes maritimes de Normandie. I. Les faits. *Bull. Mus.*, Paris, 2e sér., t. XXII, n° 5, 1950, pp. 664-671.

même temps. Cela est possible car l'alimentation n'étant pas continue (versements successifs), on constate à la partie inférieure de l'échantillon, une sortie d'eau également intermittente. Quand il y a percolation, l'écoulement à la partie inférieure du cylindre commence à peine une ou deux secondes après que le versement à la partie supérieure a eu lieu et s'arrête aussitôt que toute l'eau qui se trouve au-dessus du sable dans le cylindre a disparu dans le sable.

Les temps de percolation faibles, aboutissent dès le deuxième ou troisième versement à la constante caractérisant la station ; l'on constate ainsi que, quelque soit le nombre de versements postérieurs, ce temps reste alors invariable ainsi que l'indique le tableau suivant :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Temps de pénétration[1]...	7	18	23	24	25	27	27	27	27	26	26	26	26	25	26
Nb. cm³ restés...........	50	9	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb. cm³ filtrés...........	0	41	47	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

L'examen de ce tableau montre que les faibles temps de pénétration de l'eau correspondent à la période d'absorption de l'eau par les sables et que d'autre part les temps de percolation sont constants quand le volume de l'écoulement est exactement égal à celui de l'alimentation, c'est-à-dire quand le régime de percolation est établi.

Ce tableau correspond à un sable de dune mobile (zone à *Agropyrum*), ayant primitivement une teneur en eau infime (moins de 0,1 %). On peut donc dire que ce premier type de courbe représente 1° pour la partie croissante, la période de saturation du sol par l'eau et 2° pour la partie horizontale, la période de filtration pure à travers le sable.

Si sur ce même échantillon, mais possédant une teneur en eau beaucoup plus forte (11,2 % en surface, sol saturé et égoutté pendant cinq jours), on recommence l'expérience, on constate alors 1° que, dès le début, les temps de pénétration des premiers versements sont déjà très voisins de ceux que l'on obtient pour la valeur de la constante caractéristique de la saturation du sol (valeur voisine d'ailleurs de celle de la constante obtenue dans l'expérience

1. Dans tous les tableaux les temps sont toujours exprimés en secondes : les nombres de la première ligne donnent les temps nécessaires pour la pénétration de 50 cm³ d'eau ; les nombres de la deuxième ligne indiquent le nombre de cm³ restés dans le sol après chaque versement et ceux de la troisième ligne le nombre de cm³ filtrés à travers le sol à chaque versement.

précédente) ; 2° que la rétention de l'eau par le sol est plus faible dès les premiers versements ; les deux phénomènes dépendant d'ailleurs l'un de l'autre : ce que résume le tableau suivant.

	1	2	2	4	5	6	7	8	9
Temps de pénétration ..	25	31	29	30	30	30	30	30	30
Nb. cm³ restés dans le sol.	14	1	1	0	1	0	0	0	0
Nb. cm³ filtrés.........	36	49	49	50	49	50	50	50	50

D'autre part, il est intéressant de constater que le temps limite de percolation est pratiquement constant quelque soit le mode d'humidification du sol : cela prouve que cette limite est la résultante des conditions physiques et chimiques du sol (granulométrie, teneur en air, teneur en eau initiale, teneur en matière organique, conditions physicochimiques diverses) et non de la modalité des versements. Cette saturation correspond à « une capacité en eau » du sol ; pour l'échantillon précédent elle est de 62 gr. d'eau pure pour 300 gr. de sol sec.

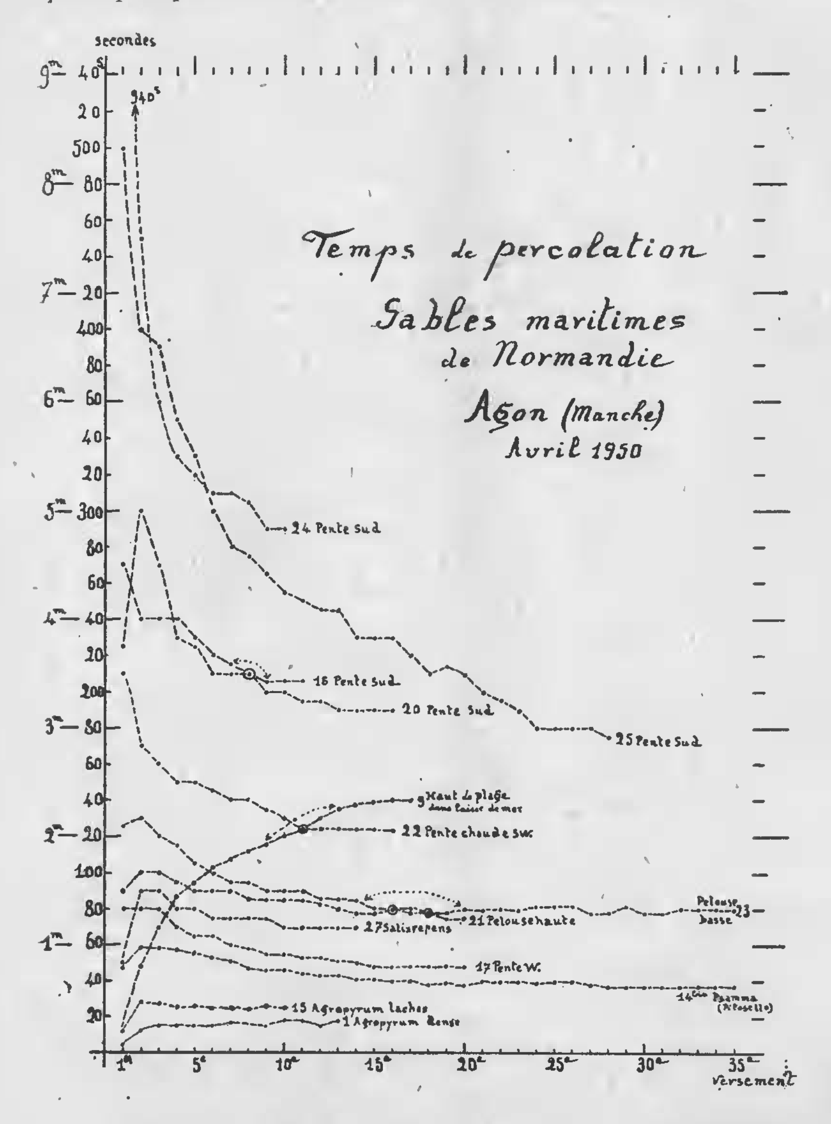
2e *cas : Courbes ascendantes à forte valeur asymptotique.*

Trois courbes sont de ce type : une seule dans les dunes mobiles se trouve présenter une valeur élevée ; elle correspond, comme je l'ai déjà dit, à une station de haut de plage, mais où il y avait en profondeur (entre 10 et 20 cm.) une épaisse couche de varech en décomposition.

La courbe, ascendante comme les précédentes, n'en diffère que par la valeur de l'ordonnée finale relativement plus importante et par le nombre plus grand de versements qu'il faut effectuer pour obtenir l'asymptote. Comme l'allure, aux valeurs absolues près, est la même dans les deux cas, il faut penser que les mêmes actions doivent donc jouer mais avec une amplitude plus grande. Ici les forces de rétention deviennent très grandes par suite de la forte teneur en matière organique, matière qui, du fait de la lenteur de son imbibition, met, elle aussi, longtemps avant d'atteindre son degré de saturation. Les très faibles valeurs initiales, analogues à celles constatées dans les expériences précédentes, sont dues uniquement à ce qu'en surface le sol était pratiquement dépourvu de matière organique, celle-ci ne se trouvant qu'en profondeur.

La deuxième expérience du même type et qui donne des résultats analogues a eu lieu dans les dunes fixées (exp. n° 18) ; mais ici la couche de sol chargée en matière organique était la partie super-

ficielle et d'autre part le sol était fortement humide. Ces faits expliquent pourquoi la première valeur est si élevée (haut pouvoir de



rétention dans la couche en contact la première avec l'eau et forte humidité) et donnent la raison de la haute valeur asymptotique de la courbe (sol humifère).

	1	2	3	4	5	6	7
Temps de pénétration...........	30	65	70	70	70	70	71

Enfin, en plus de ces deux expériences sur le terrain, un essai au laboratoire m'a donné encore des résultats analogues : j'ai pris un sol de surface de dune fixée (pente exposée au Sud) correspondant, à l'état naturel, à un tout autre type de courbe (type descendant) et je l'ai d'abord humidifié artificiellement par malaxage intime avec une petite quantité d'eau de manière à obtenir une humidité du sol bien homogène. Les résultats consignés dans le tableau qui suit montrent que le phénomène qui a eu lieu dans les cas précédents (et qui se traduit par une courbe ascendante et non pas descendante comme le fournirait le sol à l'état naturel) se renouvelle sensiblement identique, à cette petite différence près que la saturation ayant été préalablement presque réalisée, il se trouve que la valeur du temps de percolation du premier versement est alors voisine de celle de l'ordonnée de l'asymptote correspondant au sol saturé.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Temps de pénétration...	50	65	64	62	65	66	65	65	65	65	65
Nb. cm³ restés dans le sol.	26	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Nb. cm³ filtrés..........	24	48	50	50	50	50	50	50	50	50	50

Ces différentes expériences montrent donc que la circulation de l'eau dans ces sables se fait sensiblement de la même façon, qu'ils proviennent des dunes fixées ou des dunes mobiles, pourvu toutefois que les premiers possèdent dès le début de l'expérience une importante teneur en eau. Ainsi donc on constate toujours 1° une première phase de saturation du sol (partie ascendante de la courbe) ; 2° une deuxième phase de pure circulation de l'eau à travers l'échantillon (partie voisine de l'asymptote) ; 3° que la valeur asymptotique des temps de pénétration après la saturation dépend des conditions physiques, chimiques et physicochimiques du sol (humus, granulométrie) ; 4° que les premières valeurs des temps de pénétration sont d'autant plus voisines de la valeur asymptomatique que le sol est déjà plus proche de la saturation.

b) Courbes descendantes.

L'examen des sept courbes ayant cette allure descendante montrent un premier ensemble de cinq courbes dont les ordonnées ont toutes de très fortes valeurs, tant au début que pour la constante ; puis deux autres courbes, assez éloignées l'une de l'autre, mais ayant toutes deux des ordonnées notablement plus faibles que les précédentes ; elles correspondent à des stations de pentes exposées au SW. et à l'W.

Pour le premier ensemble de courbes, les temps de percolation sont très grands au début, surtout au premier versement, puis s'abaissent rapidement, gardant cependant à la constante des valeurs notablement plus élevées que celles trouvées pour les expériences du premier groupe.

L'expérience n° 22 sur une pente SW. fournit des valeurs nettement intermédiaires entre les précédentes et celles des stations des dunes mobiles, alors que celles de l'expérience n° 17 sur une pente W. en sont très voisines ; la différence entre le maximum (premier versement) et le minimum (la constante) s'atténuant du premier lot au dernier.

c) Courbes a maximum.

Il existe enfin un dernier groupe de courbes qui ont une tout autre allure que les précédentes puisqu'elles présentent un maximum.

Suivant les stations, ce maximum est plus ou moins marqué : peu net pour les dunes en voie de fixation définitive (association à *Psamma arenaria* avec tapis de *Hieracium pilosella*) ; assez bien individualisé avec des valeurs plus élevées dans les stations des dunes fixées horizontales : pannes basses (*Salix repens*) et pelouses hautes ; très marqué dans une courbe d'allure analogue aux courbes descendantes quand il s'agit de pentes exposées au sud.

La forme de ces courbes et leurs différences suivant les stations où les expériences ont été faites, permettent d'expliquer parfaitement le phénomène qui est la résultante des actions agissant dans les deux autres cas où les courbes sont soit toujours ascendantes soit toujours descendantes ; l'importance du maximum est liée à la prépondérance des conditions fournies par les dunes fixées.

Mouillabilité.

Dans les sols des dunes fixées, lors des expériences de percolation, on constate, contrairement à ce qui se passait dans les expériences des dunes mobiles, que l'échantillon de sol dans le cylindre n'est pas entièrement mouillé par l'eau et qu'une grande partie de la masse est restée intacte, n'ayant eu aucun contact avec l'eau. Celle-ci, en effet, n'a traversé l'échantillon qu'à l'intérieur d'une mince colonne du sable, toute l'eau est passée par un « puits », laissant les autres

parties absolument sèches. La formation de ce « puits » est due à la non homogénéité du sol (racines traversant l'échantillon, particules de diverses grosseurs, vides plus importants) qui permet une facilité de pénétration plus grande à certains endroits qu'à d'autres.

Des expériences, de même type que celles qui ont été faites sur les sables des dunes mobiles, montrent que, quand on arrive à des temps sensiblement constants (asymptote de percolation), on retrouve ici une pure circulation d'eau à travers l'échantillon, le volume ressortant étant égal au volume fourni à chaque versement, malgré que dans les expériences présentes une partie seulement du sable à l'intérieur du cylindre soit mouillée et que le volume de cette partie n'augmente pas d'une façon appréciable dans les temps normaux de l'expérience.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Temps de pénétration..	130	75	69	63	59	55	53	52	50	50	48	48	47	46	47	47
Nb. cm^3 restés dans le sol.	25	13	4	2	4	2	2	2	2	0	2	0	1	0	0	2
Nb. cm^3 filtrés.........	25	37	46	48	46	48	48	48	48	50	48	50	49	50	50	48

Constatant à la fois et la très grande difficulté générale de pénétration de l'eau et le fait que certaines parties du sable pouvaient être mouillées alors que d'autres ne l'étaient pas, on est amené à se demander en quoi consiste le phénomène de la mouillabilité des particules et quelles en sont les modalités.

On donne de la mouillabilité la définition suivante : un liquide mouille un solide quand l'attraction réciproque des molécules solides et liquides est supérieure à l'attraction des molécules liquides entre elles. J'ai tenté de rechercher les causes de la non mouillabilité et j'ai fait à ce sujet de nombreuses expériences tant sur des « blocs de sable » que sur des grains séparés.

Sur les échantillons en « blocs », plusieurs questions se posent immédiatement : questions de la teneur en matière organique brute (puisqu'ils proviennent de sables couverts par une végétation fermée alors que dans les dunes mobiles la végétation est très lâche), teneur en air, grosseur variée des particules, teneur en eau, etc. :

Différentes expériences de contrôle m'ont prouvé qu'aucun de ces facteurs ne pouvait être considéré comme cause de non mouillabilité.

En effet, pour ce qui est de la matière organique brute, on constate que, dans les dunes fixées, c'est principalement dans les parties les moins riches en matière organique que la pénétration se fait

le moins bien, pendant que sur les pentes exposées au nord, fortement plus chargées en humus, la percolation est plus rapide.

D'autre part, malgré que le nombre des mesures de teneur en air soit assez restreint, on peut cependant préciser que les différences constatées sont trop faibles pour qu'on puisse expliquer par là les différences si considérables de percolation enregistrées.

Des mesures antérieures de granulométrie [1] effectuées sur les deux sortes de sables ont montré, sinon identité granulométrique, du moins une analogie très complète entre les pourcentages des diverses fractions de tamisage, ce qui ne permet pas non plus de penser que le facteur granulométrie puisse jouer un rôle quelconque en l'occurence. Il en est de même pour la forme et le poli des particules, car dans les sables des dunes mobiles et fixées, on retrouve la même forme et sensiblement le même poli des grains.

Au contraire, la teneur en eau initiale des échantillons de sol joue un rôle important dans le phénomène de pénétration de l'eau dans ces sables.

On a déjà vu, au cours de l'étude des courbes toujours croissantes, ce qui se passait quand on avait humidifié préalablement un échantillon correspondant à une station qui, à l'état naturel, donnait une courbe descendante. Une série d'expériences m'a montré que ce phénomène était réversible et que la position de la courbe de perméabilité par rapport à l'asymptote ainsi que la forme même de la courbe dépendaient de la teneur en eau initiale de l'échantillon.

Ceci expliquerait les variations que l'on trouve pour une même station en différentes journées et en particulier pour l'expérience n° 27 faite ce printemps où les valeurs absolues fournies sont bien plus faibles que celles trouvées au cours des expériences de l'été 1947.

Il semble bien que c'est pour des teneurs en eau extrêmement faibles (moins de 1 %) que les valeurs de la percolation sont les plus élevées ; mais que, dès que la teneur en eau est de 5 %, le maximum est très atténué et que, comme je l'ai montré, le phénomène serait complètement inversé à partir de 15 %.

Cette variation du phénomène avec les teneurs en eau du sol permet d'expliquer pourquoi on trouve les plus fortes valeurs des temps de percolation dans les pentes exposées au sud puisque ce sont celles, parmi toutes les stations des dunes fixées, qui sont de beaucoup les plus sèches.

Mais il reste toujours à expliquer pourquoi ces sables ne sont pas mouillables alors que ceux des dunes mobiles le sont parfaitement quelque soit leur degré de siccité.

En présence de tous ces faits, j'ai alors réalisé certaines expériences

1. J. M. Turmel. Végétation de la côte Ouest du Cotentin. *Mém. Mus. nat. Paris*, Nouv. sér., t. XXVIII, 1949, fasc. 1, pp. 1-71.

sur le flottage des sables non mouillables non plus en bloc mais par très petites quantités.

Lorsqu'on verse doucement sur de l'eau un tel sable, la grande majorité des grains reste en surface quelles qu'en soient la grosseur et la nature ; et cela même en agissant sur des grains séparés de façon à éviter un effet de contact toujours possible entre les particules de sable. Si maintenant on reprend la même expérience dans une enceinte où l'on a fait un vide assez poussé (trompe à eau), l'on constate que le résultat ne change absolument pas, rendant ainsi extrêmement douteuse l'hypothèse qu'une mince pellicule d'air seulement engloberait chaque grain et l'empêcherait de descendre au fond. Mais avant de conclure il est bon de noter que les phénomènes de contact mettent en jeu des forces considérables et que les résultats négatifs obtenus ne signifient pas forcément qu'un film d'air ou d'autre matière entourant les particules n'existe pas.

Au contraire, l'existence d'un film semblerait pouvoir être indiquée par les expériences suivantes :

a) lorsque l'on verse doucement sur l'eau d'un cristallisoir une petite quantité de sable non mouillable, on constate en examinant la surface par en dessous, que peu à peu les grains tombent lentement au fond, comme si une « coque » empêchant d'abord la mouillabilité s'imbibait ensuite pour permettre plus tard que le grain soit mouillé. C'est en effet seulement une telle coque qui peut être pénétrée par l'eau et évidemment pas les particules minérales elles-mêmes (quartz, calcaire). La même expérience avec des sables mouillables montre que plus de 80 % des grains tombent *immédiatement* au fond.

b) Une autre expérience consiste à verser lentement à l'aide d'une pipette de l'alcool absolu en un seul point d'un cristallisoir rempli d'eau sur laquelle flotte une mince plaque de sable non mouillable. On voit d'abord de nombreux mouvements en tous sens agitant toutes les particules à la surface de l'eau, puis, à un moment donné les particules s'arrêtent et se groupent ; la pipette continuant à débiter de l'alcool, progressivement les particules tombent au fond, mais ici dans un temps très court, de l'ordre de quelques minutes.

En ce qui concerne l'explication des faits, tout d'abord, la question de différence de densité des divers sables ne peut être soulevée utilement, car on peut constater que la nature des grains, donc en particulier leur densité n'influe en rien sur le phénomène qui reste identique, que l'on ait affaire à du quartz (sables siliceux) ou à des débris de coquilles (sables calcaires). Il reste donc à supposer ici un enrobement des grains par une mince couche de matière qui ne serait pas mouillable par l'eau, mais le serait par l'alcool.

L'existence d'une telle couche est affirmée par G. André qui pense que l'humus est capable de se fixer mécaniquement sur les

particules minérales et que de ce fait ces particules sont recouvertes d'un enduit très mince d'origine organique, ce que prouve sa disparition à la chaleur.

Regardant alors au microscope ces sables, on voit apparaître (surtout en lumière polarisée) des traces brunâtres sur les grains, alors que sur les sables mouillables aucune telle trace n'est visible. Cette présence pourrait-elle être la cause de la non mouillabilité ? Il me faut reconnaître qu'un sable du Soudan, mouillable lui, présente cependant des traces analogues dont l'existence en conséquence ne saurait caractériser les sables non mouillables. Il ne reste plus, semble-t-il, qu'une hypothèse : la mouillabilité serait due à l'existence d'un film organique transparent extrêmement mince.

J'ai alors tenté plusieurs expériences :

Un lavage à l'alcool à 95°, ainsi qu'un lavage, une macération et un épuisement à l'éther sulfurique, au sulfure de carbone et à l'essence de térébenthine n'ont donné chacun aucun résultat ; quoique le sable soit parfaitement mouillable par les quatre liquides, une fois séchés, les grains étaient tout autant non mouillables par l'eau qu'avant.

J'ai enfin procédé à un lavage par l'eau oxygénée à 30 volumes à chaud jusqu'à cessation complète de dégagement d'oxygène. Après lavage des grains à l'eau distillée et séchage, le sable ainsi traité est devenu *totalement mouillable*, aucune particule ne reste maintenant à la surface de l'eau, alors que, même en utilisant les sables mouillables des dunes mobiles, il en restait cependant une petite proportion en suspens.

De même, un sable de Fontainebleau non complètement mouillable même après passage à l'acide sulfurique concentré et à chaud, est devenu après un passage d'une demi-heure à l'eau oxygénée à chaud entièrement mouillable lui aussi.

Il y a donc bien là un décapage des grains eux-mêmes, puisque toutes les expériences de flottation soit en masse, soit même et surtout grain par grain, concordent toutes pour permettre d'affirmer que tous les grains du sable ainsi traité sont bien mouillables. Ainsi semblent bien démontrés et l'existence d'un film organique et le fait que ce film est la cause essentielle de la non mouillabilité des grains.

Se référant à la définition donnée de la mouillabilité, le phénomène s'expliquerait donc comme suit : pour les sables mouillables, le grain non recouvert d'une pellicule organique est en contact direct avec l'eau, dans ce cas la tension interfaciale eau-grain serait insuffisante pour contrebalancer les forces de gravitation. Au contraire pour les sables non mouillables, il y aurait tout d'abord une tension interfaciale pellicule organique-eau dont la grandeur dépasserait la force de pesanteur et le grain ne tomberait pas de

suite ; ce ne serait qu'après un temps variable, pouvant être très long, d'imbibition de la matière organique par l'eau que la tension pellicule imbibée-eau arriverait à une valeur telle que la pesanteur vaincrait alors cette tension.

Ainsi aurait-on une explication qualitative partielle des faits. Il reste ensuite tout d'abord à déterminer quelle est la composition chimique du film organique entourant les grains ; étant connus les éléments de cette composition, on pourrait tenter alors une vérification quantitative des phénomènes, à supposer connues les valeurs des tensions interfaciales entre l'eau et ces divers éléments, à condition aussi que la notion de tension interfaciale ait encore un sens précis dans le cas des films en question (Duclaux).

D'autre part, il est nécessaire de poursuivre des essais d'écologie expérimentale, malheureusement de longue durée, pour réaliser à partir de sols mouillables des sols non mouillables grâce à des cultures de plantes appropriées sur des sols connus. C'est là une part des travaux que j'entreprends à l'heure actuelle.

Ainsi, après avoir pu passer par destruction de la matière organique des sols non mouillables aux sols mouillables, un procédé en quelque sorte synthétique ramènera au premier type de sol apportant alors une connaissance complète de l'origine et de la nature du film organique dont la seule présence différencie les deux sols.

Laboratoire de Culture du Muséum.